

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra výrobních strojů a konstruování - 340**

**Tažná sekce polo - kontinuální laboratorní pece**  
**s vychlazovacím boxem**

**Haulage branch semi – continual laboratory smeltery**  
**with cooling box**

**Student: Ondřej Polášek**

**Vedoucí bakalářské práce: Ing. Zdeněk Noga, CSc.**

**Ostrava 22.5. 2009**

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.

- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).

- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.

- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.

- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB -TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

.....

Plné jméno

Adresa trvalého pobytu :

Pionýrů 1265  
739 11 Frýdlant nad Ostravicí  
Česká republika

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Polášek, O. Tažná sekce polo - kontinuální laboratorní pece s vychlazovacím boxem. Ostrava: katedra výrobních strojů a konstruování., Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009, 48 s. Bakalářská práce, vedoucí Noga, Z.

Práce se zabývá návrhem tažné sekce polo - kontinuální laboratorní pece s vychlazovacím boxem tj. návrhem tažného, chladicího zařízení a zařízení pro přívod elektrického proudu k zátce krystalizátoru. V úvodu uvádím popis stávajících tažných zařízení a jejich možnou náhradu za jednodušší a dokonalejší tažné mechanismy. V dalším bodě provádím metodiku konstruování jednotlivých zařízení tažné sekce, tj. část od vytvoření požadavků až po samotnou stavební strukturu zařízení. V následujícím bodě vytvářím literární rešerši použitých zařízení tažné sekce, následují výpočty týkající se zejména uchlazení zátek krystalizátorů a pevnostní kontroly drážek zátek. Na závěr doplňuji práci o modely simulací rozložení teplotních polí jednotlivých zátek vytvořené v MKP počítačovém programu APEG.

## **ANNOTATION OF THESIS**

Polášek, O. Haulage branch semi – continual laboratory smeltery with cooling box . Ostrava: Department of Production Machines and Design, Faculty of Mechanical Engineering VŠB-Technical University of Ostrava, 2009, 48 p. Bakalářská práce, vedoucí Noga, Z.

Goal of the thesis is to design haulage branch semi – continual laboratory smeltery with cooling box, it's concept of haulage, cooling system and system for feeding electric current to the cork of the crystallizer. Description of existing haulage systems and their possible replacement to simpler and more sophisticated haulage systems is described as first. Next point is about device requirements from designing to construction structure. This procedure is based on construction methodology. Another point is literary study of haulage systems used nowadays, calculation related to cooling corks of the crystallizers and solidity check of corks grooves. Conclusion of the thesis consists of the corks temperature simulations. Model was created in APEG computer program and simulated by finite elements method.

**Klíčová slova :** aktuátor, zátka, chlazení, tažení, přívod elektrického proudu, hydraulický obvod, elektrický obvod, drážka zátky

**Key words:** actuator, cork, cooling, haulage, feeding electric current, hydraulic circuit, electrical circuit, groove of cork

## **Obsah bakalářské práce:**

<b>Seznam použitého značení.....</b>	<b>9</b>
<b>1 Úvod .....</b>	<b>12</b>
<b>2 Konstrukční návrh tažné sekce .....</b>	<b>13</b>
2.1 Černá skříňka .....	13
2.2 Požadavky.....	13
2.2.1 Požadavky na chladicí zařízení.....	13
2.2.2 Požadavky na tažné zařízení.....	15
2.2.3 Požadavky na zařízení přivádějící elektrický proud k zátce.....	15
2.3 Transformační proces.....	16
2.3.1 Transformační proces – tažení, chlazení,přívodu el. proudu k zátce.....	16
2.3.2 Transformační proces – chlazení.....	17
2.3.3 Transformační proces – tažení.....	18
2.3.4 Transformační proces – přívodu el. proudu k zátce .....	19
2.4 Funkční struktura.....	20
2.5 Morfologická matice.....	20
2.6 Orgánová struktura.....	21
2.7 Stavební struktura.....	21
<b>3. Literární rešerše použitých zařízení .....</b>	<b>22</b>
3.1 Tažné zařízení.....	22
3.2 Chladicí zařízení.....	23
3.3 Zařízení pro přívod elektrického proudu k zátce.....	27
<b>4. Výběr výpočtových metod vhodných pro návrh chladícího a tažného zařízení.....</b>	<b>28</b>
4.1 Výběr výpočtových metod pro návrh tažného zařízení.....	28
4.1.1 Návrh velikosti průměru vnější měděné trubky.....	28

4.1.2 Výpočet zátek krystalizátoru.....	29
4.1.3 Výpočet tlakových ztrát v hydraulickém obvodu tažné sekce...	40
4.1.4 Kontrolní výpočet drážky zátky proti případnému prokluzu pohybového šroubu aktuátoru.....	43
4.2 Výběr výpočtových metod pro návrh chladicího zařízení.....	45
4.2.1 Poloha a zdvih hydraulických nerezových trubek.....	45
<b>5.Závěr.....</b>	<b>46</b>
 <b>Seznam použité literatury.....</b>	 <b>47</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>49</b>

## Seznam použitého značení

A	Plocha	[mm <sup>2</sup> ]
D <sub>1</sub>	Vnější průměr měděné trubky	[mm]
D	Vnitřní průměr nerezové trubky	[mm]
D <sub>h</sub>	Hydraulický průměr	[mm]
F	Maximální tažná síla aktuátoru	[N]
L	Délka válcové stěny návárku vnitřní nerezové trubky	[mm]
Nu	Nuseltovo kritérium	[-]
R <sub>mTi</sub>	Mez pevnosti titanu	[MPa]
R <sub>p0,2Cu</sub>	Mez kluzu mědi	[MPa]
Re	Reynoldsovo kritérium	[-]
Pr	Prandtlovo kritérium	[-]
P <sub>1</sub>	Tepelný výkon potřebný k odvedení	[W]
P <sub>2</sub>	Tepelný výkon odvedený rovinnou stěnou zátky	[W]
P <sub>3</sub>	Tepelný výkon odvedený válcovou stěnou zátky	[W]
S	Plocha v kontaktu spodní plochy zátky s vodou	[mm <sup>2</sup> ]
S <sub>1</sub>	Plocha vnitřního průřezu nerezové trubky	[mm <sup>2</sup> ]
S <sub>2</sub>	Mezikruh. plocha průřezu měď. trubky s nerez. vnitřní trubicí	[mm <sup>2</sup> ]
S <sub>kontislitku</sub>	Plocha vytavovaného kontislitku	[m <sup>2</sup> ]
S <sub>trubky</sub>	Plocha průřezu měděné trubky	[mm <sup>2</sup> ]
S <sub>kabelů</sub>	Společná plocha průřezů spodních svařovacích kabelů	[mm <sup>2</sup> ]
a <sub>v40</sub>	Součinitel teplotní vodivosti vody při teplotě 40°C	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
b <sub>1</sub>	Menší délka drážky zátky	[mm]
b <sub>2</sub>	Větší délka drážky zátky	[mm]
b	Hloubka drážky zátky	[mm]
cp	Měrná tepelná kapacita	[JKkg <sup>-1</sup> ]
cp <sub>v20</sub>	Měrná tepelná kapacita vody při teplotě 20°C	[JKkg <sup>-1</sup> ]
cp <sub>v40</sub>	Měrná tepelná kapacita vody při teplotě 40°C	[JKkg <sup>-1</sup> ]
d <sub>1</sub>	Vnitřní průměr měděné trubky	[mm]
d <sub>2</sub>	Vnitřní průměr zátky	[mm]
d <sub>3</sub>	Průměr návárku na vnitřní nerezové trubce	[mm]
d <sub>h</sub>	Průměr potrubí	[m]
h	Šířka drážky zátky	[mm]



$h_1$	Velikost mezery mezi nerezovou trubkou a stěnou zátky	[mm]
$l$	Délka potrubí	[m]
$o$	Omočený obvod	[mm]
$q$	Hustota tepelného toku	[Wm <sup>-2</sup> ]
$k_1$	Bezpečnost proti prokluzu šroubu	[-]
$k_2$	Bezpečnost proti smyku	[-]
$s_{Cu}$	Tloušťka stěny měděné zátky	[mm]
$t_{zátky}$	Teplota zátky krystalizátoru	[°C]
$t_{vstup\ vody}$	Teplota vstupní chladicí vody	[°C]
$t_{výstup\ vody}$	Teplota výstupní chladicí vody	[°C]
$v_1$	Rychlost vody v přívodním průřezu trubek	[ms <sup>-1</sup> ]
$v_2$	Rychlost vody v odváděcím průřezu trubek	[ms <sup>-1</sup> ]
$w_v$	Rychlost vody	[ms <sup>-1</sup> ]
$\pi$	Ludolfovo číslo	[-]
$\alpha$	Úhel smykové plochy drážky zátky	[°]
$\alpha_2$	Součinitel přestupu tepla ze spodní plochy zátky do vody	[Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\lambda$	Tepelná vodivost	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_{Cu}$	Tepelná vodivost mědi při teplotě 40°C	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\Lambda_{tř}$	Součinitel tření	[-]
$\lambda_{v40}$	Tepelná vodivost vody při teplotě 40°C	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\eta$	Dynamická viskozita	[Pas]
$\eta_{v20}$	Dynamická viskozita vody při teplotě 20°C	[Pas]
$\eta_{v40}$	Dynamická viskozita vody při teplotě 40°C	[Pas]
$\rho$	Měrná hmotnost	[kgm <sup>-3</sup> ]
$\rho_{v20}$	Měrná hmotnost vody při teplotě 20°C	[kgm <sup>-3</sup> ]
$\rho_{v40}$	Měrná hmotnost vody při teplotě 40°C	[kgm <sup>-3</sup> ]
$\zeta$	Ztrátový součinitel místními odpory	[-]
$\zeta_1$	Ztrátový součinitel ohybu kruhového průřezu	[-]
$\zeta_2$	Ztrátový součinitel vtoku s náhlým zúžením průřezu	[-]
$\zeta_3$	Ztrátový součinitel vtoku s náhlým rozšířením průřezu	[-]
$\zeta_4$	Ztrátový součinitel ostrého kolena 90°	[-]
$\zeta_5$	Ztrátový součinitel vtoku do trubky s ostrou hranou	[-]
$\zeta_{celk.}$	Celkový ztrátový součinitel	[-]

$\nu$	Kinematická viskozita	$[\text{m}^2\text{s}^{-1}]$
$\nu_{v40}$	Kinematická viskozita vody při teplotě 40°C	$[\text{m}^2\text{s}^{-1}]$
$\sigma_t$	Tahové napětí	$[\text{MPa}]$
$\sigma_{\text{Dt-Ti}}$	Dovolené tahové napětí titanu	$[\text{MPa}]$
$\tau_s$	Smykové napětí	$[\text{MPa}]$
$\tau_{\text{DS-Cu}}$	Dovolené smykové napětí mědi	$[\text{MPa}]$
$\Delta t$	Rozdíl teplot	$[\text{°C}]$
$\Delta p_z$	Celková tlaková ztráta	$[\text{Pa}]$
$\Delta p_{z,tř}$	Ztráta tlaku třením	$[\text{Pa}]$
$\Delta p_{z,m}$	Tlaková ztráta místními odpory	$[\text{Pa}]$

# 1. Úvod

Úkolem bakalářské práce je návrh tažné sekce polo-kontinuální laboratorní pece s vychlazovacím boxem pro tavení a rafinaci neželezných kovů ( Ti –Ni; Ti – Al ), tzn. návrh tažného, chladicího zařízení a zařízení přivádějící elektrický proud k zátce krystalizátoru. Společně budou muset být schopna tato tři zařízení - táhnout vytavovaný Ti – kontislítek, současně ho vychlazovat a přivádět k němu elektrický proud.

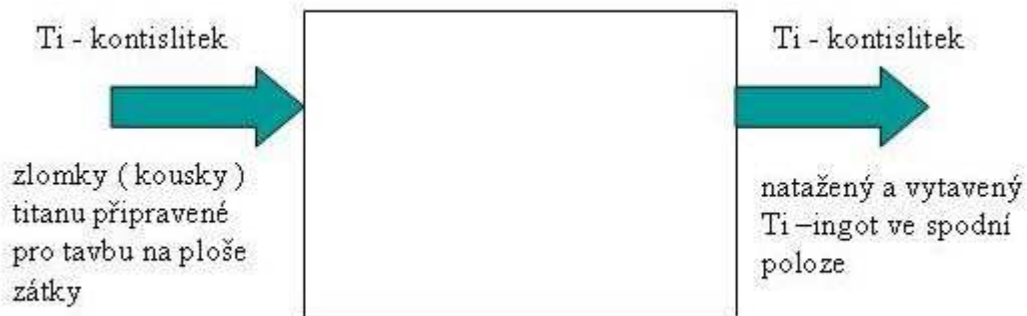
Současné stávající návrhy tažného zařízení tažné sekce polo-kontinuální laboratorní pece s vychlazovacím boxem nejsou nejvhodnější ani nejdokonalejší.

Při využití prostředků a zařízení současné moderní technologie je možno nahradit stávající návrhy tažných zařízení, ( hydraulický systém - pracující na principu nestlačitelnosti hydraulické kapaliny, využívající jí ke zdvihu hydraulického pístu následně pak k realizaci samotného procesu tažení a mechanický systém – sestávající z elektromotoru s regulací otáček, který přes mechanický převod tvořený ozubeným pastorkem s maticí s ozubením a pohybovým šroubem vytváří rotační posuvný pohyb, kterým se realizuje pohyb tažení ), mnohem jednoduššími a dokonalejšími tažnými systémy.

Pro chladicí zařízení bude použito čerpadlo s chladicími okruhy vedoucími k zátce krystalizátoru a ostatním částem pece [ 3 ].

## 2 Konstrukční návrh tažné sekce

### 2.1 Černá skříňka



Obr. 1 – Schéma černé skříňky [ 1 ]

### 2.2 Požadavky

#### 2.2.1 Požadavky na chladicí zařízení

a ) Hydraulický obvod tažné sekce plazmové pece

Funkční požadavky:

- schopnost přivedení pracovního média k zátce krystalizátoru za účelem uchlazení přetavovaného titanového kontislitku tak, aby nedocházelo k natavení zátky krystalizátoru
- vstupní teplota chladicího média : 20°C
- výstupní teplota chladicího média nesmí překročit teplotu : 40°C ( vytvoření vodního kamene )
- provozní tlak pracovního média 1,2 Mpa ( parametr dán čerpadlem ) [ 3 ]
- zabezpečení úniku chladicího média do vnitřního prostoru pece

#### Konstrukční požadavky:

- docílení co nejmenších hydraulických ztrát ( jak místních tak i třecích ) v potrubí
- jednoduchost – tvar ( princip trubka v trubce )
- požadavek na co nejmenší zastavěný prostor v peci
- odvod chladicího média z místa vychlazování zátky krystalizátoru a jeho následný odvod do nádrže
- při náhlé poruše nebo při náhlém úniku chladicího média z hydraulického obvodu okamžité přerušení dodávky elektrického proudu a hydraulického média

#### b ) Zátka krystalizátoru

#### Funkční požadavky:

- funkce uchlazení přetavovaného titanového kontislitku tak, aby nedocházelo k natavení zátky tzn. splnění funkce chlazení
- teplota zátky nesmí překročit teplotu : 300 °C ( difuzní znečištění povrchu mědi )
- vstupní teplota vody : 20 °C
- výstupní teplota vody nesmí překročit teplotu : 40 °C ( vytvoření vodního kamene )
- elektrický proud : 1000 A

#### Konstrukční požadavky:

- materiál : dobrá elektrická a tepelná vodivost, odolnost proti korozi - např. čistá měď , případně stříbro ( nevýhoda vysoké pořizovací ceny )
- možnost zaměnitelnosti zátky ( obdélníková, čtvercová, kruhová )
- minimální hmotnost

## **2.2.2 Požadavky na tažné zařízení**

### Funkční požadavky:

- zajištění schopnosti spočívávající v tažení vytavovaného titanového kontislitku
- schopnost přesného nastavení požadované polohy a v této poloze setrvávat
- funkce tažení realizovatelná i s ohledem na nežádoucí působící síly ( síly třecí mezi hydraulickými trubkami )

### Konstrukční požadavky:

- snadná regulace posuvu
- vysoká životnost
- malé konstrukční provedení ( malý zastavěný prostor v peci – aktuátor )
- jednoduchost ( hybridní krokový aktuátor )
- snadná údržba ( bezúdržbový provoz – aktuátor )
- jednoduchá obsluhovatelnost ( stisknutí např. jen jednoho tlačítka )

## **2.2.3 Požadavky na zařízení přivádějící elektrický proud k zátce**

### Funkční požadavky:

- funkce spočívávající ve schopnosti bezpečného vedení elektrického proudu k vnější měděné trubce resp. zátce krystalizátoru a tedy společně s horními svařovacími kabely u hořáku, vytvoření elektrického obvodu pece

### Konstrukční požadavky:

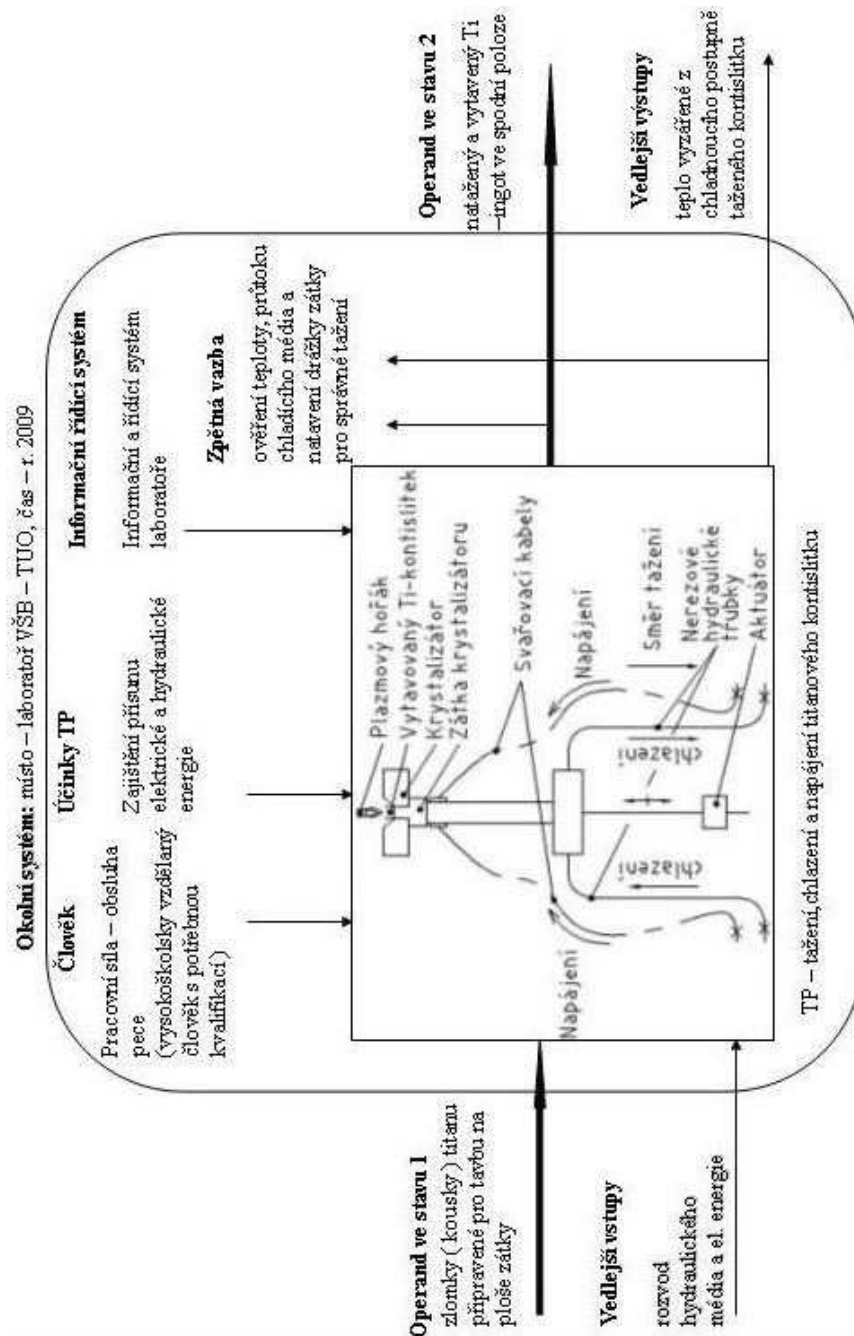
- materiál vnitřního průřezu svařovacích kabelů – měď
- materiál vnější měděné trubky - měď
- materiál zátky - měď

### Bezpečnostní požadavky:

- při náhlé poruše okamžité přerušení přívodu elektrického proudu a tím okamžité rozpojení elektrického obvodu

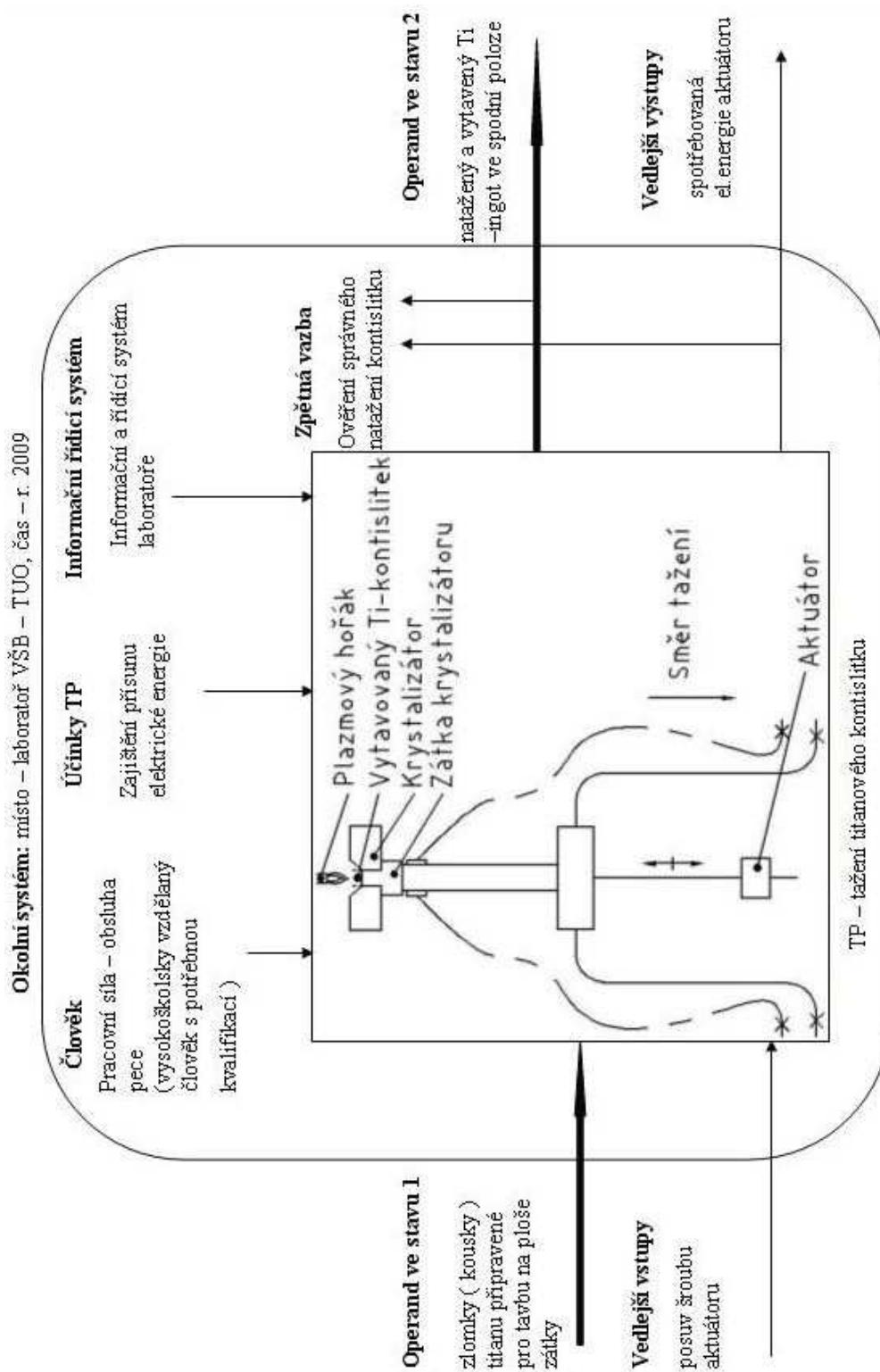
## 2.3 Transformační proces

### 2.3.1 Transformační proces – tažení, chlazení, přívodu el. proudu k zátce



Obr. 2 – Transformační proces tažení, chlazení a přívodu el. proudu k zátce [ 1 ]

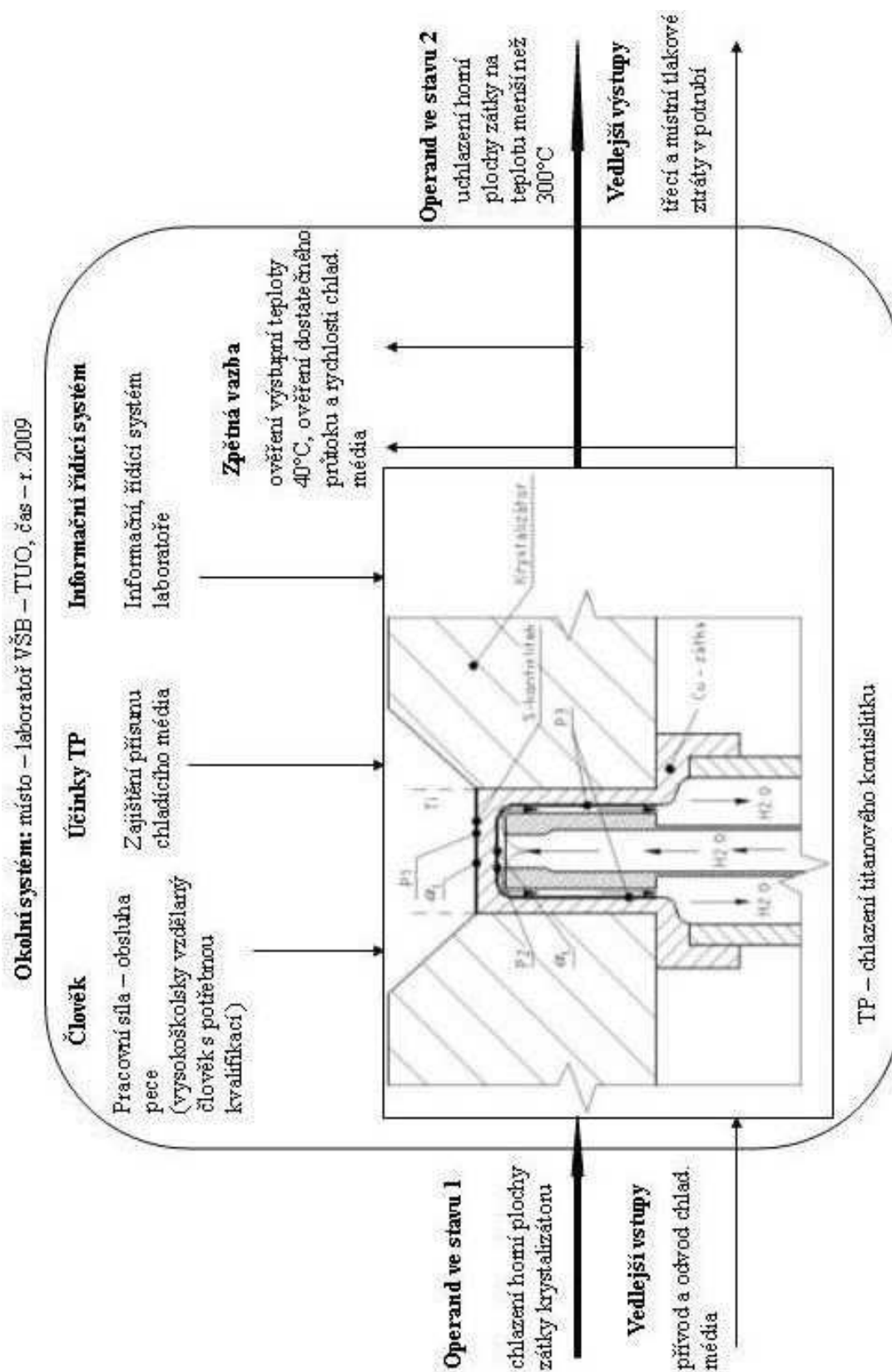
## 2.3.2 Transformační proces – tažení



Obr. 3 – Transformační proces tažení [ 1 ]



### 2.3.3 Transformační proces – chlazení

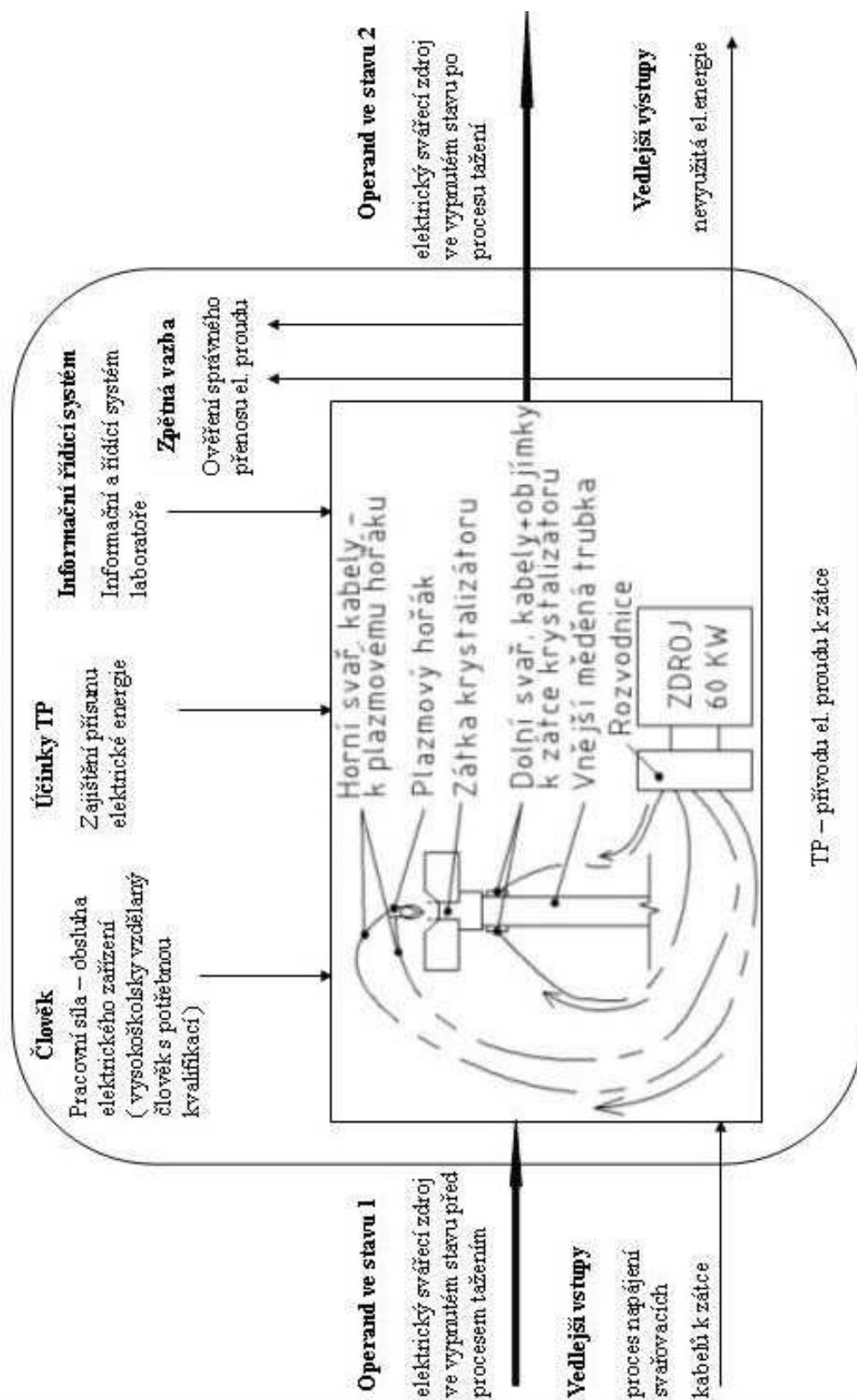


Obr. 4 – Transformační proces chlazení [ 1 ]

## 2.3.4 Transformační proces – přívodu elektrického proudu k zátce

### Transformační proces – přívodu el. proudu k zátce [ 1 ]

Okolní systém: místo – laboratoř VŠB – TUO, čas – r. 2009



Obr. 5 – Transformační proces přívodu elektrického proudu k zátce [ 1 ]

## 2.4 Funkční struktura



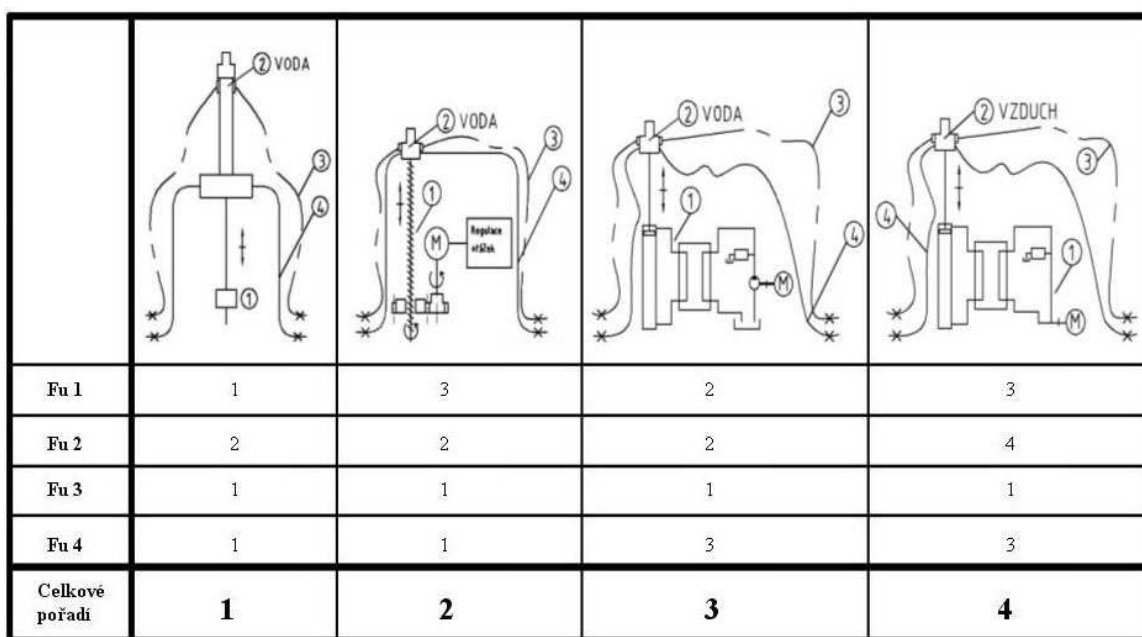
Obr. 6 – Funkční struktura [ 1 ]

## 2.5 Morfologická matice

Dílčí funkce		Funkční principy / Orgány – nositelé funkcí			
		1	2	3	4
1	Tažný pohyb UMOŽNIT	Hydraulický systém – píst, čerpadlo, hydromotor	Krokový motor - aktuátor	Mechanický systém – matice, ozub.kolo, elektromotor	Pneumatický systém – píst, pneumatický motor
2	Chlazení zátky UMOŽNIT	Chlazení vodou	Chlazení vzduchem	Chlazení speciálními chladicími roztoky	
3	Přivedení el.proudu k zátce UMOŽNIT	Zdroj pro svařování pod tavidlem – svař. kabely			
4	Vedení chladicího média UMOŽNIT	Hydraulické pryžové hadice	Nerezové hydraulické trubky, (princip trubka v trubce)		

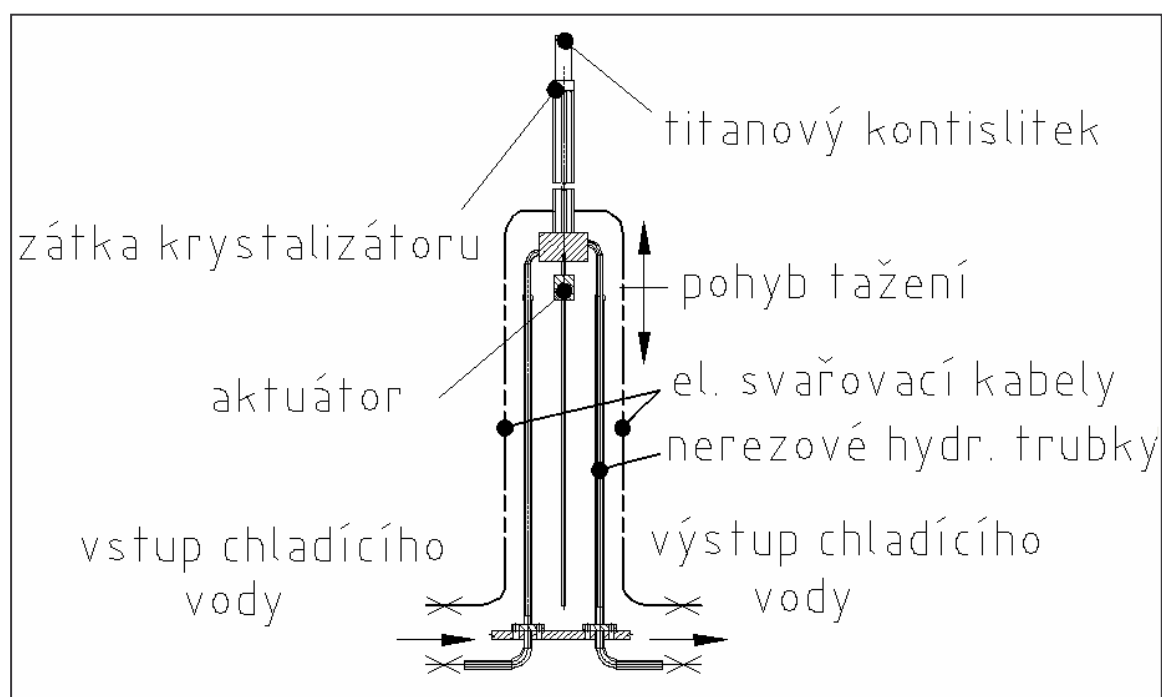
Obr. 7 – Morfologická matice [ 1 ]

## 2.6 Orgánová struktura



Obr. 8 – Orgánová struktura [ 1 ]

## 2.7 Stavební struktura



Obr. 9 – Stavební struktura [ 1 ]

### 3. Literární rešerše použitých zařízení tažné sekce

#### 3.1 Tažné zařízení

Hybridní krokový aktuátor [ 4 ]

Základní princip krokového motoru je úplně jednoduchý. Proud procházející cívkou statoru vytvoří magnetické pole, které přitáhne opačný pól magnetu rotoru. Vhodným zapojováním cívek dosáhneme vytvoření rotujícího magnetického pole, které otáčí rotorem.

Mezi nesporné výhody tohoto tažného zařízení patří velký výkon ve velmi malém provedení, vysoká životnost, malá hlučnost, bezúdržbový provoz - tím nízké náklady na provoz aktuátoru, přesné nastavení polohy a tuto polohu i přes působící síly udržet. Dalšími výhodami jsou spolehlivost, jednoduchost, malý prostor k zastavení a možnost snadné obsluhy.

Toto tažné zařízení má ale i své drobné nevýhody. Mezi které patří například trvalý odběr proudu i za situace, kdy se motor netočí dále jeho vyšší pořizovací cena.

Aktuátor NEMA 17 [ 4 ], bude upevněn a sevřen čtyřmi tyčemi, které budou přivařeny k vnitřnímu plášti pece.

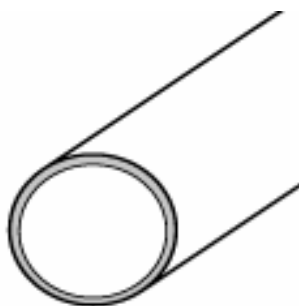


Obr. 10 – Hybridní krokové aktuátory [ 4 ]

#### 3.2 Chladicí zařízení – hydraulický obvod

a ) Nerezové bezešvé trubky [ 7 ]

Funkce - vedení hydraulického média, bude realizováno principem “ Trubka v trubce “ prostřednictvím 2 spodních - pevných a 2 horních – pohyblivých, nerezových bezešvých trubek. Spodníma o průměrech  $d = 18 \text{ mm}$  s tloušťkou stěn  $t = 3 \text{ mm}$  a délkách  $l = 750 \text{ mm}$  a horníma o průměrech  $d = 12 \text{ mm}$  s tloušťkou stěn  $t = 1 \text{ mm}$  a délkou  $l = 720 \text{ mm}$ .



Obr. 11 – Nerezové bezešvé trubky [ 7 ]

b ) Převlečná matice s těsněním [ 8 ]

Bude plnit schopnost dokonalého utěsnění v kontaktu horních a spodních trubek, nebo –li zabránění úniku pracovního média při vzájemném vysouvání a zasouvání hydraulických trubek.

Na konci spodních hydraulických trubek budou zhotoveny vnější závit M 18 x 1,5 pro našroubování převlečné matice. Na vnitřním průměru trubky bude vysoustružena vnitřní drážka pro umístění pryžového těsnění.

c ) Přivařovací nerezová kolena [ 7 ]

Tato přivařovací nerezová kolena o úhlech  $90^\circ$  budou přivařena na spodní a horní nerezové bezešvé trubky. Horní přivařovací kolena budou kromě horních nerezových trubek ještě dále přivařena k rozváděcí kostce.



Obr. 12 – Přivařovací nerezová kolena [ 7 ]

d ) Ploché přivařovací příruby [ 7 ]

Spodní trubky budou upevněny ve spodní desce plazmové pece za pomoci plochých přivařovacích přírub o vnějších průměrech  $d = 75 \text{ mm}$  se 4 dírami pro 4 šrouby velikosti M10 x 40.



Obr. 13 – Plochá přivařovací příruba [ 7 ]

e ) Přivařovací potrubní objímky [ 7 ]

Kromě plochých přivařovacích nerezových přírub, které zajišťují funkci zabráňující možnému nežádoucímu posuvu spodních hydraulických trubek, budou jeste na tyto trubky instalovány potrubní objímky.



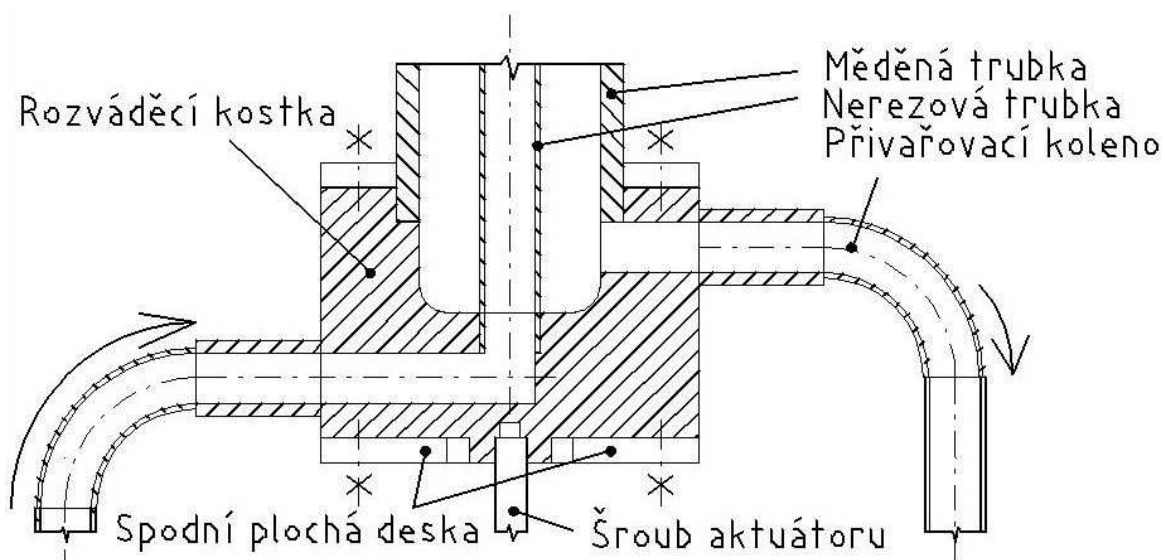
Tyto nerezové potrubní přivařovací objímky budou v zařízení sloužit jako prvky k docílení stability hydraulického obvodu a taky budou plnit funkci k zabránění případného zborcení celého hydraulického obvodu.



Obr. 14 – Přivařovací potrubní objímky [ 7 ]

f ) Rozváděcí kostka hydraulického obvodu

Bude plnit funkci rozvádění chladicího média od vstupu do hydraulického obvodu přes vychlazování ploch zátky až po výstup chladicího média z hydraulického obvodu. Rozváděcí kostka bude sevřena a upevněna šrouby ve dvou plochých nerezových deskách, které se budou pohybovat ve vedení, tvořené čtyřmi vodícími tyčemi a svařovanými plochými polotovary. Kostka bude svařena ze tří dílů a vyvrtána.



Obr. 15 – Schéma rozváděcí kostky [ 15 ]

g ) Měděná trubka [ 9 ]



Splnění funkce odvodu chladicího média z místa vychlazování ploch zátky a jeho následný odvod do hydraulických trubek směrem do nádrže. Na tuto trubku budou připojeny elektrické svařovací kabely prostřednictvím objímek.

Měděná trubka o průměru  $d = 45 \text{ mm}$  a tloušťce stěny  $t = 5 \text{ mm}$ , bude zašroubována do rozváděcí kostky a bude se pohybovat ve vedení.

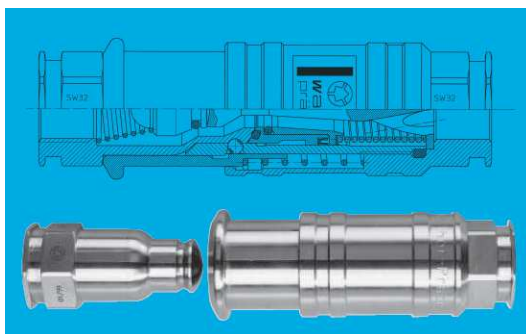
Na obou koncích měděné trubky budou zhotoveny závity. Na jednom konci pro samotné našroubování trubky do rozváděcí kostky a na druhém pro našroubování zátky krystalizátoru.

#### h ) Nerezová trubka [ 7 ]

Splnění funkce přívodu chladicího média k ploše vychlazování zátky krystalizátoru. Trubka o průměru  $d = 16 \text{ mm}$  s tloušťkou stěny  $t = 2 \text{ mm}$ , bude zašroubována do rozváděcí kostky. Na obou koncích trubky budou zhotoveny závity. Jeden - vnitřní pro našroubování jednotlivých návarků pro jednotlivé zátky, a druhý - vnější, pro samotné našroubování trubky do rozváděcí kostky.

#### i ) Hydraulická rychlospojka bezúkapová [ 11 ]

Budou instalovány v místech vstupů a výstupů v hydraulickém obvodu ( před a za plazmovou pecí ). Budou sloužit ke snadnému a pohotovému spojení a rozpojení hydraulického potrubí. Rychlospojky umožní spojení hydraulického potrubí bez vniknutí vzduchu pomocí speciálního ventilu a rozpojení bez úkapů. Umožňují také jednoduchou ovladatelnost ( ovládání pouze jednou rukou ).



Obr. 16 – Hydraulická rychlospojka bezúkapová [ 11 ]

### 3.3 Zařízení pro přívod elektrického proudu k zátce

Zdroje pro svařování pod tavidlem Forwel 1200 Golem [ 10 ]

Náš zdroj pro svařování pod tavidlem se skládá ze dvou přívodních kabelů o průměrech  $95 \text{ mm}^2$  vedoucích z traťu případně z transformátoru a ze čtyř svařovacích kabelů o průřezech  $10 \text{ mm}^2$ . Z těchto čtyř svařovacích kabelů, dva horní kabely o průřezech  $10 \text{ mm}^2$  povedou k plazmovému hořáku a další dva, spodní svařovací kabely o stejných průřezích povedou k objímkám upevněným na měděné trubce až k zátce, tím docílíme vytvořit elektrického obvodu pece.



Obr. 17 – Zdroj pro svařování pod tavidlem Forwel 1200 Golem [ 10 ]

Napájecí napětí	400 V
Počet fází	3
Frekvence	50 Hz
Jmenovitý proud	90 A
Jmenovitý příkon	64 kVA
Cos phi	0,76
Účinnost	82 %
Jištění	2 x 55 A
Přívodní kabel	4 x $10 \text{ mm}^2$
Rozsah nastavení	50 - 1 200 A
Regulace napětí	10 - 60 V
Svářecí proud - 60% DZ	1 200 A
Svářecí proud - 100% DZ	1 000 A
Svářecí kabel	2 x $95 \text{ mm}^2$
Krytí	IP 21
Izolační třída	H
Chlazení	AF
Hmotnost	430 kg
Rozměry	880 x 550 x 1 270 mm

Obr.18 – Parametry svařovacího zdroje pod tavidlem Forwel 1200 Golem [ 10 ]

## 4 Výběr výpočtových metod vhodných pro návrh chladicího a tažného zařízení

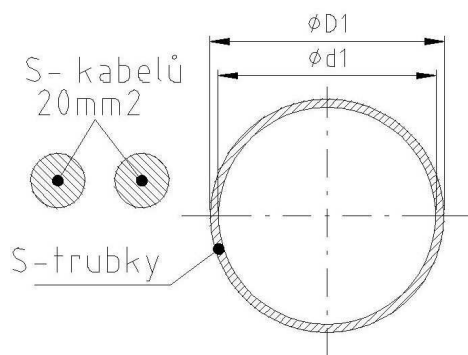
### 4.1 Výběr výpočtových metod vhodných pro návrh chladicího zařízení

#### 4.1.1 Návrh velikosti průměru vnější měděné trubky

Ze svařovacího zdroje vystupují jak již bylo zmíněno 4 svařovací kabely o velikostech průřezů  $4 \times 10 \text{ mm}^2$ .

Dva z nich směřují k plazmovému hořáku ( horní svařovací kabely ), dva k zátce ( spodní svařovací kabely ), respektive k měděné trubce. Z důvodu bezpečnosti a zajištění správné funkce elektrického obvodu musí platit podmínka průřezů.

Společná velikost dvou spodních svařovacích kabelů tj.  $S_{\text{kabelů}} = 2 \times 10 \text{ mm}^2$ , musí být větší, minimálně rovna průřezové ploše vnější měděné trubky vedoucí k zátce krystalizátoru. Viz. Obr.č.



Obr. 19 – Schéma průřezů spodních svařovacích kabelů a průřez měděné trubky [ 15 ]

$$S_{\text{trubky}} \geq S_{\text{kabelů}} \quad [\text{mm}^2] \quad (4.1.1.1)$$

$$\frac{\pi \cdot (D_1^2 - d_1^2)}{4} \geq S_{\text{kabelů}} \Rightarrow D_1, d_1 \quad [\text{mm}] \quad (4.1.1.2)$$

$S_{\text{trubky}}$	Plocha průřezu měděné trubky	$[\text{mm}^2]$
$S_{\text{kabelů}}$	Společná plocha průřezů spodních svařovacích kabelů	$[\text{mm}^2]$
$\pi$	Ludolfovo číslo	$[-]$
$D_1$	Vnější průměr měděné trubky	$[\text{mm}]$

$d_1$                       Vnitřní průměr měděné trubky                      [mm]

- z toho vyplývá, vhodně navolit vnější průměr  $D_1$  a vnitřní rozměr  $d_1$  měděné trubky.

Volím  $D_1 = 45$  mm  $d_1 = 35$  mm

$$\frac{\pi \cdot (D_1^2 - d_1^2)}{4} \geq S_{\text{kabelů}}$$

$$\frac{\pi \cdot (45^2 - 35^2)}{4} = 628,32 \text{ mm}^2 \geq 20 \text{ mm}^2$$

Vyhovuje

#### 4.1.2 Výpočet zátek krystalizátoru

Hlavním funkčním požadavkem zátky je - funkce uchlazení přetavovaného titanového kontislitku o zadaném průřezu ( 25 x 10, 30 x 30, Ø 35 ) tak, aby nedocházelo k natavení zátky, tzn. splnění funkce chlazení.

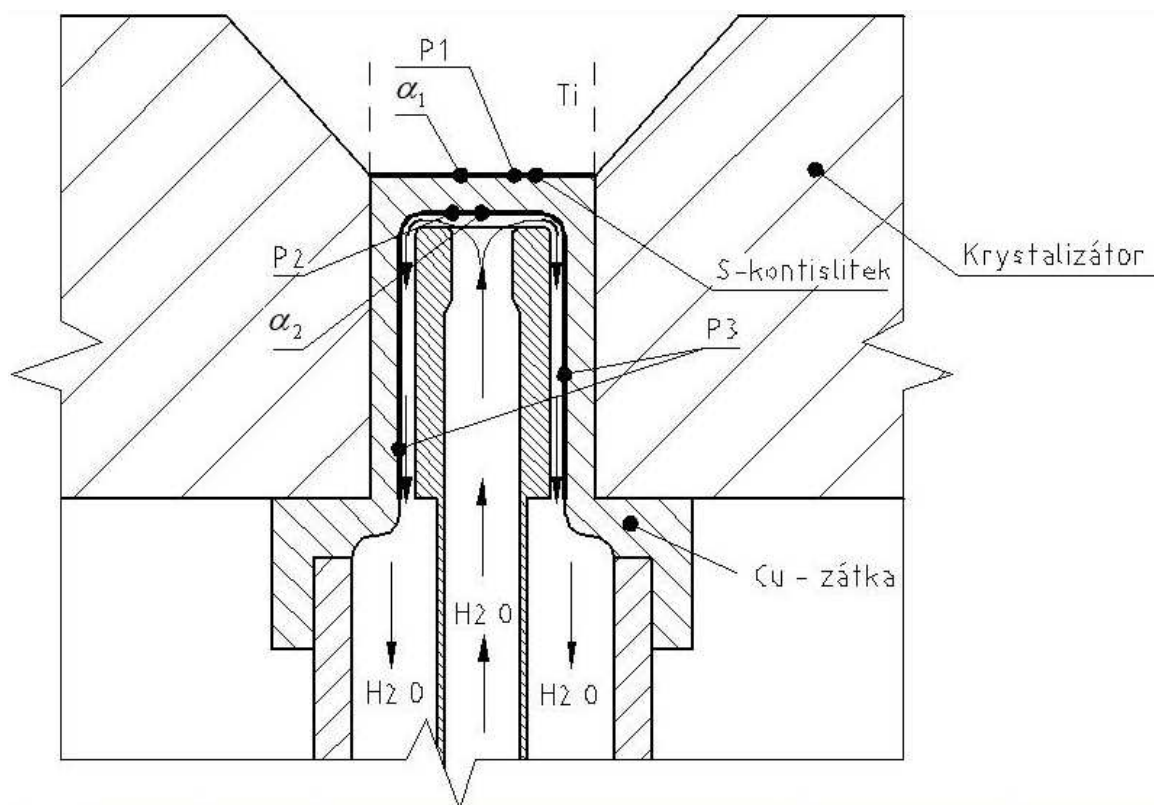
Další funkční požadavky:

- teplota zátky nesmí překročit teplotu : 300 °C ( difuzní znečištění povrchu mědi )
- vstupní teplota vody : 20 °C
- výstupní teplota vody nesmí překročit teplotu : 40 °C ( tvorba vodního kamene )
- elektrický proud : 1000 A

Konstrukční požadavky:

- materiál : čistá měď
- možnost zaměnitelnosti zátky ( obdélníková, čtvercová, kruhová )
- minimální hmotnost

V našem případě vychlazování titanového kontislitku se bude jednat o sdílení tepla - konvekcí. Sdílení tepla konvekcí se realizuje mezi proudícím prostředím a povrchem pevných těles při jejich odlišné teplotě.[ 2 ]



Obr. 20 – Schéma znázornění tepelných výkonů na zátce [ 15 ]

Tepelný výkon, který je potřeba odvádět ( tepelný výkon Ti - kontislietku ) [ 2 ]:

$$P_1 = q \cdot S_{\text{kontislietek}} \quad [ \text{W} ] \quad ( 4.1.2.1 )$$

$P_1$	Tepelný výkon potřebný k odvedení	[W]
$q$	Hustota tepelného toku	[Wm <sup>-2</sup> ]
$S_{\text{kontislietku}}$	Plocha vytavovaného kontislietku	[m <sup>2</sup> ]

Bylo mi sděleno vedoucím mé bakalářské práce [3] , že hustota tepelného toku Ti – kontislietku se pohybuje v rozmezí 2,1 – 3,0 MW. m<sup>-2</sup>

a ) Obdélníková zátka 25 x 10

$$P_1 = q \cdot S_{\text{kontislietek}} = 3000000 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} = 750 \text{ W}$$

b ) Čtvercová zátka 30 x 30

$$P_1 = q \cdot S_{\text{kontislietek}} = 3000000 \cdot 9 \cdot 10^{-4} = 2700 \text{ W}$$

c ) Kruhová zátka Ø 35

$$P_1 = q \cdot S_{kontislietek} = 3000000 \cdot 9,62 \cdot 10^{-4} = 2886 \text{ W}$$

Hydraulický průměr [ 2 ]:

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{o} = \frac{4 \cdot \pi \cdot D \cdot h_1}{\pi \cdot D} \Rightarrow D_h = 4 \cdot h_1 \quad [\text{m}] \quad (4.1.2.2)$$

$D_h$	Hydraulický průměr	[m]
$A$	Plocha	[m <sup>2</sup> ]
$o$	Omočený obvod	[m]
$D$	Vnitřní průměr nerezové trubky	[m]
$h_1$	Velikost mezery mezi nerezovou trubkou a stěnou zátky	[m]

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{o} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 0,01 \cdot 0,002}{\pi \cdot 0,01} \Rightarrow D_h = 4 \cdot 0,002 = 0,008 \text{ m}$$

Nuseltovo kritérium, v našem případě sdílení tepla nucenou konvekcí, je funkcí Reynoldsova a Prandtlova čísla [ 2 ]:

$$Nu = f(R_e, P_r)$$

<b>Voda</b>					
<b>T</b> [ °C ]	<b>cp</b> [ J · K · kg <sup>-1</sup> ]	<b>λ</b> [ W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	<b>ρ</b> [ m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]	<b>η</b> [ Pa · s ]	<b>ν</b> [ m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ]
20	4180,9	0,580	998	10,046 · 10 <sup>-4</sup>	1,01 · 10 <sup>-6</sup>
40	4178,4	0,627	992,22	0,654 · 10 <sup>-3</sup>	6,59 · 10 <sup>-7</sup>

Obr. 21 – Tabulka fyzikální vlastnosti vody [ 2 ]

Prandtlovo kritérium [ 2 ]:

$$Pr = \frac{\nu_{v40}}{a_{v40}} \quad [-] \quad (4.1.2.3)$$

Pr	Prandtlovo kritérium	[-]
$\nu_{v40}$	Kinematická viskozita vody při teplotě 40°C	[m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$a_{v40}$	Součinitel teplotní vodivosti vody při teplotě 40°C	[m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]

$$\text{Pr} = \frac{\nu_{v40}}{a_{v40}} = \frac{6,59 \cdot 10^{-7}}{1,5 \cdot 10^{-7}} = 4,36 \text{ [-]}$$

Součinitel teplotní vodivosti vody při teplotě 40°C [ 2 ]:

$$a_{v40} = \frac{\lambda_{v40}}{cp_{v40} \cdot \rho_{v40}} \quad [\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (4.1.2.4)$$

$a_{v40}$	Součinitel teplotní vodivosti vody při teplotě 40°C	[Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_{v40}$	Tepelná vodivost vody při teplotě 40°C	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$cp_{v40}$	Měrná teplená kapacita vody při teplotě 40°C	[JKkg <sup>-1</sup> ]
$\rho_{v40}$	Měrná hmotnost vody při teplotě 40°C	[kgm <sup>-3</sup> ]

$$a_{v40} = \frac{\lambda_{v40}}{cp_{v40} \cdot \rho_{v40}} = \frac{0,627}{4178,4 \cdot 992,22} = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Reynoldsovo kritérium [ 2 ]:

Volím rychlost chladící vody  $w_v = 6 \text{ ms}^{-1}$

$$R_e = \frac{w_v \cdot \rho_{v20} \cdot D_h}{\eta_{v20}} \quad [-] \quad (4.1.2.5)$$

Re	Reynoldsovo kritérium	[-]
$w_v$	Rychlost vody	[ms <sup>-1</sup> ]
$\rho_{v20}$	Měrná hmotnost vody při teplotě 20°C	[kgm <sup>-3</sup> ]
$\eta_{v20}$	Dynamická viskozita vody při teplotě 20°C	[Pas]

$$R_e = \frac{w_v \cdot \rho_{v20} \cdot D_h}{\eta_{v20}} = \frac{6 \cdot 998 \cdot 0,008}{10,046 \cdot 10^{-4}} = 47684,65 \text{ [-]} \Rightarrow \text{turbulentní proudění [ 2 ]}$$

Součinitel přestupu tepla  $\alpha_2$  na rovinné vnitřní stěně zátky krystalizátoru se poté stanoví dle vztahů [2]:

$$Nu = \frac{\alpha_2 \cdot D_h}{\lambda_{v40}} \Rightarrow \alpha_2 = \frac{\lambda_{v40} \cdot Nu}{D_h} \quad (4.1.2.6)$$

Pro sdílení tepla konvekcí u turbulentní mezní vrstvy platí vztahy [ 2 ]:

$$\text{Pro } 5 < Re < 1 \cdot 10^3 \quad Nu = 0.5 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.38}$$

$$\text{Pro } 1 \cdot 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5 \quad Nu = 0.25 \cdot Re^{0.6} \cdot Pr^{0.38}$$

$$\text{Pro } 3 \cdot 10^5 < Re < 2 \cdot 10^6 \quad Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.37}$$

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_{v40} \cdot Nu}{D_h} = \frac{\lambda_{v40} \cdot (0.25 \cdot Re^{0.6} \cdot Pr^{0.38})}{D_h} = \frac{0.627 \cdot (0.25 \cdot 47684.65^{0.6} \cdot 4.36^{0.38})}{0.008} =$$

$$\alpha_2 = 21698.17 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

<b>Měď</b>				
<b>T</b> [ °C ]	<b>cp</b> [ J · K · kg <sup>-1</sup> ]	<b>λ</b> [ W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	<b>ρ</b> [ m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]	<b>E</b> [ MPa ]
20	383	386,12	8900	1,1 · 10 <sup>5</sup>
40	385	386,65		

Obr. 22 – Tabulka fyzikálních vlastností mědi [ 2 ]

Tepelný výkon odvedený rovinnou stěnou zátky [ 2 ]:

$$P_2 = \frac{t_{zátka} - t_{vstupvody}}{\frac{s_{Cu}}{\lambda_{Cu}} \cdot \frac{1}{\alpha_2}} \cdot S \quad [\text{W}] \quad (4.1.2.7)$$

$P_2$	Tepelný výkon odvedený rovinnou stěnou zátky	[W]
$t_{zátka}$	Teplota zátky krystalizátoru	[°C]
$t_{vstup \text{ vody}}$	Teplota vstupní chladicí vody	[°C]
$s_{Cu}$	Tloušťka stěny měděné zátky	[m]
$\lambda_{Cu}$	Tepelná vodivost mědi při teplotě 40°C	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_2$	Součinitel přestupu tepla ze spodní plochy zátky do vody	[Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
$S$	Plocha v kontaktu spodní plochy zátky s vodou	[m <sup>2</sup> ]



a ) obdélníková zátka 25 x 10

$$P_2 = \frac{t_{zátky} - t_{vstupvody}}{\frac{s_{Cu}}{\lambda_{Cu}} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot S = \frac{300 - 20}{\frac{0,0435}{386,65} + \frac{1}{21986,17}} \cdot 9,62 \cdot 10^{-4} = 1702,90 \text{ W}$$

b ) čtvercová zátka 30 x 30

$$P_2 = \frac{t_{zátky} - t_{vstupvody}}{\frac{s_{Cu}}{\lambda_{Cu}} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot S = \frac{300 - 20}{\frac{0,005}{386,65} + \frac{1}{21986,17}} \cdot 3,8 \cdot 10^{-4} = 1820,78 \text{ W}$$

c ) kruhová zátka Ø 35

$$P_2 = \frac{t_{zátky} - t_{vstupvody}}{\frac{s_{Cu}}{\lambda_{Cu}} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot S = \frac{300 - 20}{\frac{0,005}{386,65} + \frac{1}{21986,17}} \cdot 4,9 \cdot 10^{-4} = 2347,85 \text{ W}$$

Tepelný výkon odvedený válcovou stěnou zátky [ 2 ]:

Výpočet tohoto tepelného výkonu by měl splnit požadavek z hlediska bezpečnosti a k zamezení překročení teploty zátky 300 °C.

$$P_3 = \frac{(t_{zátky} - t_{vstupvody}) \cdot \pi}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{Cu}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_3} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot L \quad [\text{W}] \quad (4.1.2.8)$$

$P_3$	Tepelný výkon odvedený válcovou stěnou zátky	[W]
$d_2$	Vnitřní průměr zátky	[m]
$d_3$	Průměr návárku na vnitřní nerezové trubce	[m]
L	Délka válcové stěny návárku vnitřní nerezové trubky	[m]

a ) obdélníková zátka 25 x 10

$$P_3 = \frac{(t_{zátky} - t_{vstupvody}) \cdot \pi}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{Cu}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_3} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot L = \frac{(50 - 20) \cdot \pi}{\frac{1}{2 \cdot 386,65} \cdot \ln \frac{0,031}{0,035} + \frac{1}{2000}} \cdot 0,0196 = 5384,63 \text{ W}$$

b ) čtvercová zátka 30 x 30

$$P_3 = \frac{(t_{zátky} - t_{vstupvody}) \cdot \pi}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{Cu}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_3} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot L = \frac{(50 - 20) \cdot \pi}{\frac{1}{2 \cdot 386,65} \cdot \ln \frac{0,018}{0,022} + \frac{1}{2000}} \cdot 0,0381 = 14930,68 \text{ W}$$

c ) kruhová zátka Ø 35

$$P_3 = \frac{(t_{zátky} - t_{vstupvody}) \cdot \pi}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{Cu}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_3} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot L = \frac{(50 - 20) \cdot \pi}{\frac{1}{2 \cdot 386,65} \cdot \ln \frac{0,021}{0,025} + \frac{1}{2000}} \cdot 0,037 = 12702,17 \text{ W}$$

Musí platit podmínka:

$$P_2 + P_3 > P_1 \quad [\text{W}] \quad (4.1.2.9)$$

a ) obdélníková zátka 25 x 10

$$1702,9 + 5384,63 > 750$$

$$7087,53 > 750 \Rightarrow \underline{\text{Vyhovuje}}$$

b ) čtvercová zátka 30 x 30

$$14930,68 + 1820,78 > 2700$$

$$16751,46 > 2700 \Rightarrow \underline{\text{Vyhovuje}}$$

c ) kruhová zátka Ø 35

$$12702,17 + 2347,85 > 2886 \text{ W}$$

$$15050,02 > 2886 \text{ W} \Rightarrow \underline{\text{Vyhovuje}}$$

Pro dostatečné vychlazení plochy zátky musí platit bilanční rovnice [ 2 ]:

$$m_1 = m_2$$

$$m \cdot c_p \cdot \Delta t = \alpha_2 \cdot S \cdot \Delta t$$

$$\frac{\pi \cdot D_h^2}{4} \cdot w_v \cdot \rho_{v20} \cdot c_{pv20} \cdot (t_{vystupvody} - t_{vstupvody}) = \alpha_2 \cdot S \cdot (t_{zátky} - t_{vstupvody}) \quad (4.1.2.10)$$

$c_{pv20}$  Měrná tepelná kapacita vody při teplotě 20°C [JKkg<sup>-1</sup>]

$t_{vystup\ vody}$  Teplota výstupní chladicí vody [°C]

a ) obdélníková zátka 25 x 10

$$\frac{\pi \cdot D_h^2}{4} \cdot w_v \cdot \rho_{v20} \cdot c_{pv20} \cdot (t_{vystupvody} - t_{vstupvody}) = \alpha_2 \cdot S \cdot (t_{zátky} - t_{vstupvody})$$

$$\frac{\pi \cdot 0,008^2}{4} \cdot 6 \cdot 998 \cdot 4180,9 \cdot (24,7 - 20) = 21986,17 \cdot 9,62 \cdot 10^{-4} \cdot (300 - 20)$$

$$\underline{5914,5=5922,2} \Rightarrow \text{Obě strany rovnice se rovnají}$$

b ) čtvercová zátka 30 x 30

$$\frac{\pi \cdot D_h^2}{4} \cdot w_v \cdot \rho_{v20} \cdot c_{pv20} \cdot (t_{vystupvody} - t_{vstupvody}) = \alpha_2 \cdot S \cdot (t_{zátky} - t_{vstupvody})$$

$$\frac{\pi \cdot 0,008^2}{4} \cdot 6 \cdot 998 \cdot 4180,9 \cdot (21,9 - 20) = 21986,17 \cdot 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot (300 - 20)$$

$$\underline{2390,9=2339,33} \Rightarrow \text{Obě strany rovnice se rovnají}$$

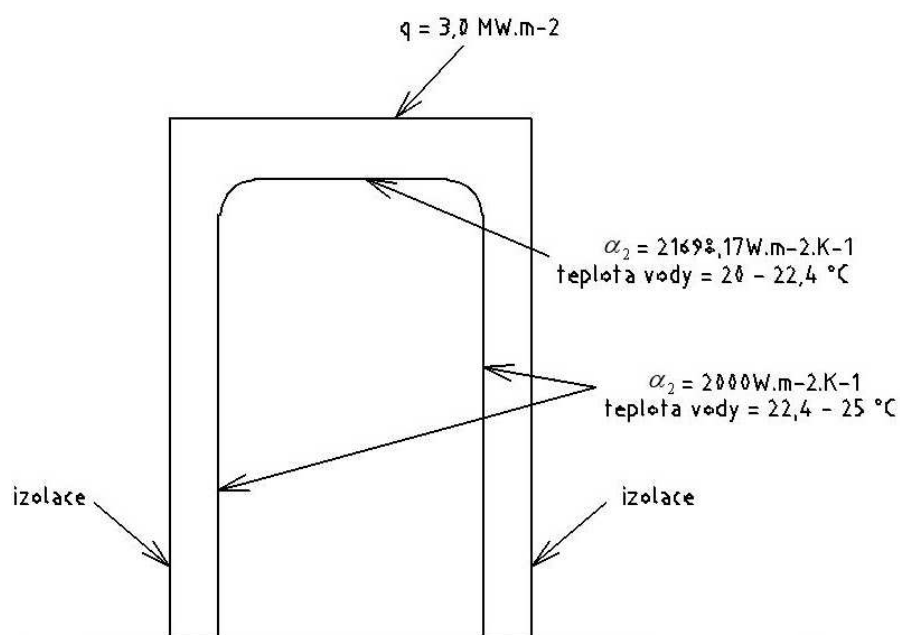
c ) kruhová zátka Ø 35

$$\frac{\pi \cdot D_h^2}{4} \cdot w_v \cdot \rho_{v20} \cdot c_{pv20} \cdot (t_{vystupvody} - t_{vstupvody}) = \alpha_2 \cdot S \cdot (t_{zátky} - t_{vstupvody})$$

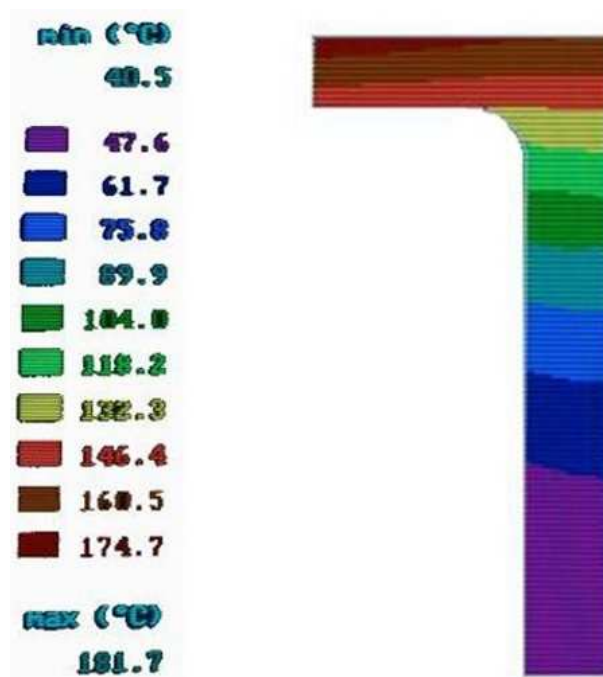
$$\frac{\pi \cdot 0,008^2}{4} \cdot 6 \cdot 998 \cdot 4180,9 \cdot (22,4 - 20) = 21986,17 \cdot 4,9 \cdot 10^{-4} \cdot (300 - 20)$$

$$\underline{3020,2=3016,5} \Rightarrow \text{Obě strany rovnice se rovnají}$$

Grafické modely jednotlivých zátek a jejich simulace rozložení teplotních polí namodelované v programu APEG [ 17 ] .

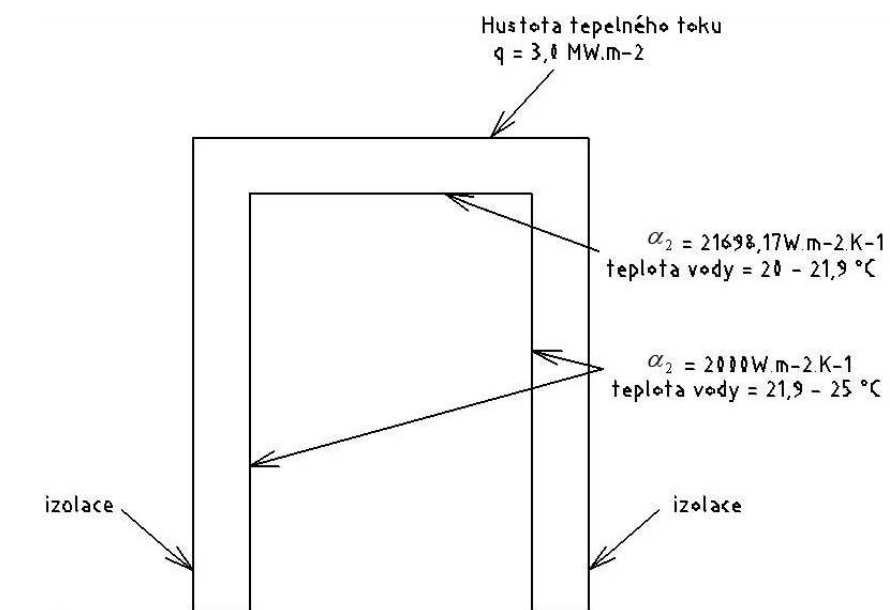


Obr. 21 – Znázornění okrajových podmínek na plochách kruhové zátky [ 15 ]

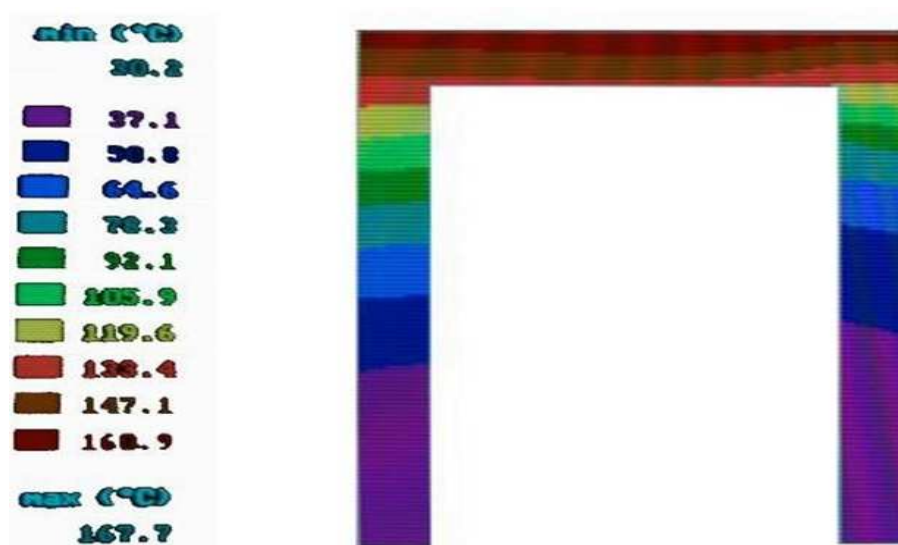


Obr. 22 - Simulace rozložení teplotního pole u kruhové zátky [ 17 ]

Na simulaci rozložení teplotního pole kruhové zátky lze vidět, že na horní ploše zátky teplota dosáhne nejvyšší hodnoty  $181,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , tzn. že požadavek na uchlazení zátky pod teplotu  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$  bude splněn.

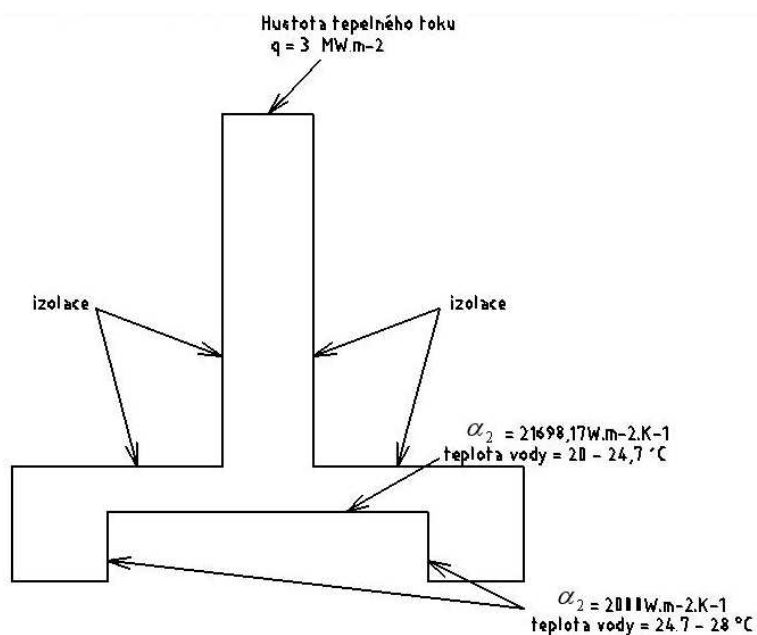


Obr.23 – Znázornění okrajových podmínek na plochách čtvercové zátky [ 15 ]

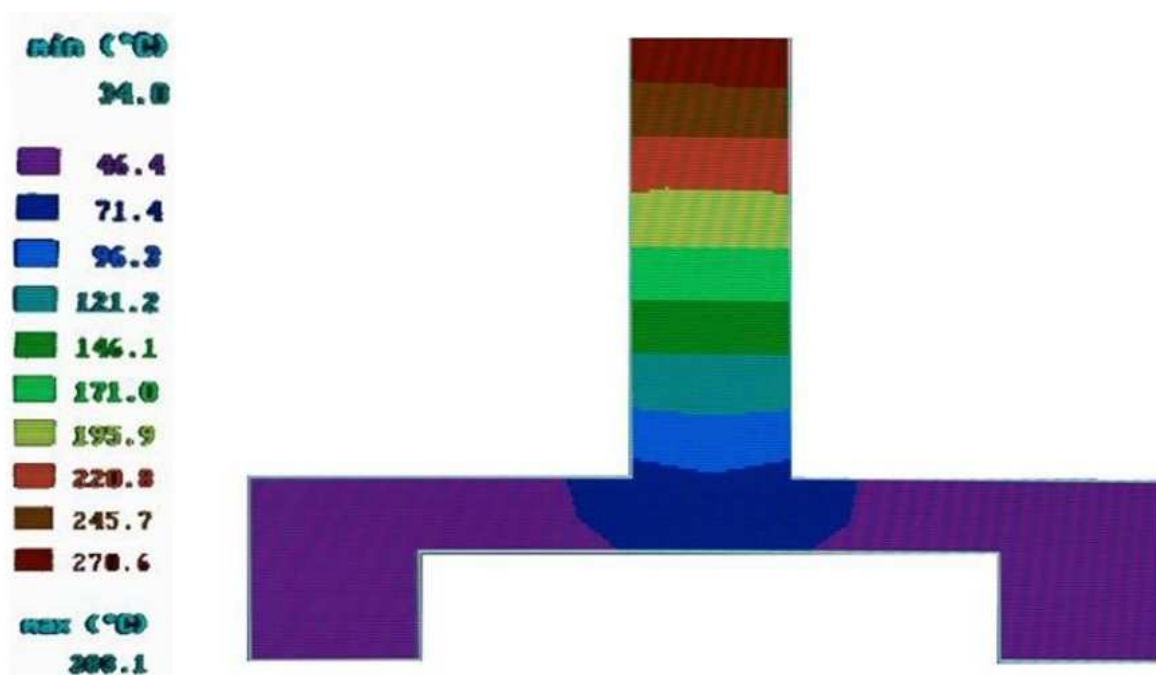


Obr. 24 - Simulace rozložení teplotního pole u čtvercové zátky [ 17 ]

Na simulaci rozložení teplotního pole čtvercové zátky lze podobně jako u kruhové zátky v předchozím modelu vidět, že na horní ploše zátky teplota dosáhne nejvyšší hodnoty 167,7 °C, tzn. že požadavek na uchlazení zátky pod teplotu 300 °C bude splněn.



Obr. 25 – Znázornění okrajových podmínek na plochách obdélníkové zátky [ 15 ]



Obr. 26 – Simulace rozložení teplotního pole u obdélníkové zátky [ 17 ]

Na simulaci rozložení teplotního pole obdélníkové zátky můžeme vidět nejvyšší dosaženou teplotu na horní ploše zátky, ta dosahuje teploty 283,1 °C – znamená to že obdélníková zátka je nejkritičtější zátkou z možného hlediska překročení teploty 300 °C. Jelikož ale teplota na horní ploše zátky nedosáhla teploty 300°C, je požadavek na zabránění přesáhnutí teploty 300 °C splněn.

### 4.1.3 Výpočet tlakových ztrát v hydraulickém obvodu tažné sekce

Z fyzikálního hlediska lze hydraulické odpory ( hydraulické ztráty ) rozdělit na ztráty třením a ztráty místními odpory.

Pro celkovou tlakovou ztrátu lze napsat vztah [ 2 ] :

$$\Delta p_z = \Delta p_{z,tř} + \Delta p_{z,m} \quad [ \text{Pa} ] \quad ( 4.1.3.1 )$$

$$\Delta p_{z,tř} \quad \text{Ztráta tlaku třením} \quad [ \text{Pa} ]$$

$$\Delta p_{z,m} \quad \text{Tlaková ztráta místními odpory} \quad [ \text{Pa} ]$$

Tlaková ztráta třením se vypočítá z rovnice [ 2 ] :

$$\Delta p_{z,tř} = \lambda_{tř} \cdot \frac{l}{d_h} \cdot \frac{w_v^2 \cdot \rho_{v20}}{2} \quad [ \text{Pa} ] \quad ( 4.1.3.2 )$$

$$\lambda_{tř} \quad \text{Součinitel tření} \quad [ - ]$$

$$l \quad \text{Délka potrubí} \quad [ \text{m} ]$$

$$d_h \quad \text{Průměr potrubí} \quad [ \text{m} ]$$

$$w_v \quad \text{Rychlost vody} \quad [ \text{ms}^{-1} ]$$

$$\rho_{v20} \quad \text{Hustota vody při teplotě 20°C} \quad [ \text{kgm}^{-3} ]$$

Pro turbulentní proudění se součinitel tření stanoví vztahem 4.1.3.3 dle Blausiuse [ 2 ] :

$$\lambda_{tř} = 0.3164 \cdot R_e^{-0.25} \quad [ - ] \quad ( 4.1.3.3 )$$

$$Re \quad \text{Reynoldsovo kritérium} \quad [ - ]$$

$$\lambda_{tř} = 0.3164 \cdot 47684.65^{-0.25}$$

$$\lambda_{tř} = 0.0214 \quad [ - ]$$

Pro zjednodušení výpočtu třecích tlakových ztrát budeme počítat se středním průměrem potrubí celého hydraulického obvodu tažné sekce. Volím  $d_h = 0,012$  m. Délku  $l$  hydraulického obvodu pece budeme počítat při horním poloze, z důvodu největší rozvinuté délky trubek – největších třecích ztrát ( délka  $l = 4,609$  m ).

$$\Delta p_{z, \text{tr}} = \lambda_{\text{tr}} \cdot \frac{l}{d_h} \cdot \frac{w_v^2 \cdot \rho_{v20}}{2} = 0,0214 \cdot \frac{4,609}{0,012} \cdot \frac{6^2 \cdot 998}{2}$$

$$\Delta p_{z, \text{tr}} = 144\,989,922 \text{ Pa} = \underline{144,989 \text{ kPa}}$$

Tlakovou ztrátu místními odpory vyjadřuje vztah 4.1.3.4 [ 2 ] :

$$\Delta p_{z, m} = \zeta \cdot \frac{w_v^2 \cdot \rho_{v20}}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (4.1.3.4)$$

$\zeta$  Ztrátový součinitel místními odpory [-]

Ztrátový součinitel místními odpory je závislý především na druhu místní ztráty, konstrukčních parametrech a na režimu proudění.

Pro zjednodušení výpočtu místních tlakových ztrát nebudeme počítat ztrátové součinitele místních odporů pro jednotlivé části hydraulického obvodu, ale vypočteme je podle zjednodušeného vzorce daného vztahem 4.1.3.6 [ 2 ] .

V hydraulickém obvodu tažné sekce se vyskytuje 8 ohybů kruhového průřezu, 4 vtoky s náhlým zúžením průřezu, 3 vtoky s náhlým rozšířením průřezu, 1 ostré koleno  $90^\circ$  a jeden vtok do trubky s ostrou hranou. Tyto konstrukční tvary definují jednotlivé ztrátové součinitele:

Ztrátový součinitel ohybu kruhového průřezu -  $\zeta_1$  se stanoví z Přílohy č. 2.1

Ztrátový součinitel vtoku s náhlým zúžením průřezu -  $\zeta_2$  se stanoví z Přílohy č. 2.2

Ztrátový součinitel vtoku s náhlým rozšířením průřezu -  $\zeta_3$  se stanoví z Přílohy č. 2.3

Ztrátový součinitel ostrého kolena  $90^\circ$  -  $\zeta_4$  se stanoví z Přílohy č.2.4

Ztrátový součinitel vtoku do trubky s ostrou hranou -  $\zeta_5$  se stanoví z Přílohy č.2.5



Celkový ztrátový součinitel místních ztrát se stanoví :

$$\zeta_{celk.} = 8 \cdot \zeta_1 + 4 \cdot \zeta_2 + 3 \cdot \zeta_3 + \zeta_4 + \zeta_5 \quad [ - ] \quad ( 4.1.3.5 )$$

$\zeta_{celk.}$  Celkový ztrátový součinitel místních ztrát [-]

Hodnoty místních ztrátových součinitelů  $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4, \zeta_5$  odečteny z Příloh 2.1 – 2.5

$$\zeta_1 = 0,15$$

$$\zeta_2 = 0,15$$

$$\zeta_3 = 0,09$$

$$\zeta_4 = 1,2$$

$$\zeta_5 = 0,5$$

$$\zeta_{celk.} = 8 \cdot \zeta_1 + 4 \cdot \zeta_2 + 3 \cdot \zeta_3 + \zeta_4 + \zeta_5 = 8 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,09 + 1,2 + 0,5$$

$$\zeta_{celk.} = 3,77 [ - ]$$

Tlakovou ztrátu místními odpory vypočteme tedy dle vztahu ( 4.1.3.6 ) :

$$\Delta p_{z,m} = \zeta_{celk.} \cdot \frac{w_v^2 \cdot \rho_{v20}}{2} = 3,77 \cdot \frac{6^2 \cdot 998}{2} \quad [ \text{Pa} ] \quad ( 4.1.3.6 )$$

$$\Delta p_{z,m} = 67\,724,28 \text{ Pa} = \underline{67,724 \text{ kPa}}$$

Celková tlaková ztráta v hydraulickém obvodu tažné sekce:

$$\Delta p_z = \Delta p_{z,tř} + \Delta p_{z,m} = 144989 + 67724$$

$$\Delta p_z = 212713 \text{ Pa} = \underline{212,713 \text{ kPa}}$$

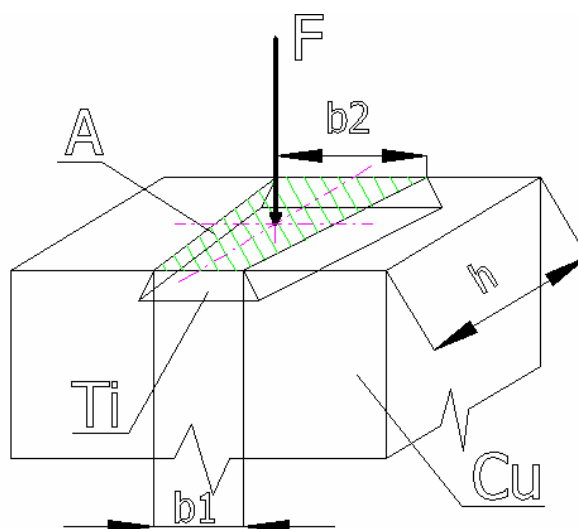
Námi definované čerpadlo disponuje pracovním tlakem 1,2 MPa [ 3 ]. Jelikož celková tlaková ztráta v hydraulickém obvodě nám vyšla zhruba 0,213 MPa, znamená to že tlak ve středu hydraulického obvodu tj. v místě vychlazování ploch zátky krystalizátoru pece, bude 1,0935 MPa. Tlak v místě výstupu z hydraulického obvodu pece bude pak 0,987 MPa. V Příloze č.4 je graf porovnání celkových tlakových ztrát při zvýšení chladicí rychlosti vody z 6 m/s na rychlost chladicí vody o hodnotě 7 m/s.

#### 4.1.4 Kontrolní výpočet drážky zátky proti případnému prokluzu pohybového šroubu aktuátoru

Maximální tažná síla aktuátoru:  $F = 600 \text{ N}$  [ 4 ]

Budeme provádět pouze kontrolní výpočet drážky u obdélníkové zátky (  $25 \times 10$  ), z důvodu nejmenší plochy a tedy nejkritičtějšího průřezu. Zbylé dvě drážky ( čtvercová  $30 \times 30$  a kruhová  $\varnothing 35$  ) již budou vzhledem k obdélníkové drážce zátky předimenzované.

a ) Pevnostní kontrola na tah:



Obr. 27 – Schéma drážky zátky namáhané na tah [ 15 ]

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \leq \sigma_{Dt-Ti} = \sigma_t = \frac{F}{\frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h} \leq \sigma_{Dt-Ti} \quad [\text{Mpa}] \quad (4.1.2.1)$$

$$\sigma_{Dt-Ti} = \frac{Rm_{Ti}}{k_1} \quad [\text{Mpa}] \quad (4.1.2.2)$$

$\sigma_t$	Tahové napětí	[MPa]
F	Maximální tažná síla aktuátoru	[N]
A	Plocha	[mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{Dt-Ti}$	Dovolené tahové napětí titanu	[MPa]

$b_1$	Menší délka drážky zátky	[mm]
$b_2$	Větší délka drážky zátky	[mm]
$h$	Šířka drážky zátky	[mm]
$Rm_{Ti}$	Mez pevnosti titanu	[MPa] [ 5 ]
$k_1$	Bezpečnost proti prokluzu šroubu	[-]

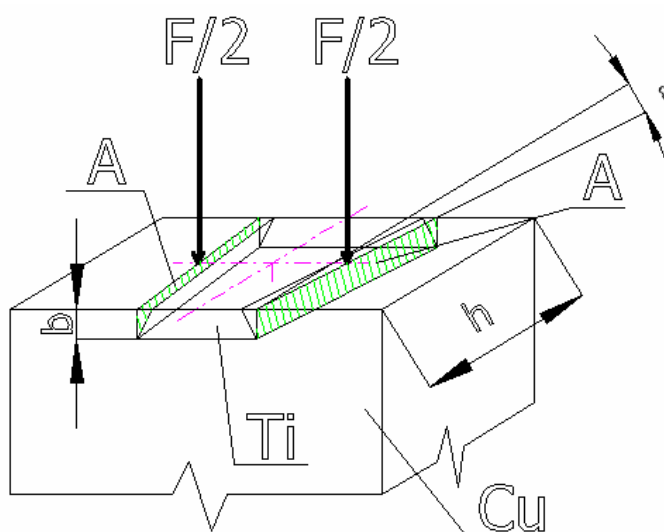
$$\sigma_t = \frac{F}{\frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h} \leq \sigma_{Dt-Ti} = \sigma_t = \frac{600}{\frac{4+8}{2} \cdot 10} \leq \sigma_{Dt-Ti}$$

$$\sigma_t = 10 \text{ MPa} \leq 333,33 \text{ MPa} \Rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Volím bezpečnost proti prokluzu šroubu  $k_1 = 3$

$$\sigma_{Dt-Ti} = \frac{Rm_{Ti}}{k} = \frac{1000}{3} = 333,33 \text{ MPa}$$

b ) Pevnostní kontrola na smyk:



Obr. 28 - Schéma drážky zátky namáhané na tah [ 15 ]

$$\tau_s = \frac{F}{2 \cdot A} \leq \tau_{Ds-Cu} = \tau_s = \frac{F}{2 \cdot \left( b \cdot \frac{h}{\cos \alpha} \right)} \leq \tau_{Ds-Cu} \quad [\text{Mpa}] \quad (4.1.2.3)$$

$$\tau_{Ds-Cu} = \frac{Re_{Cu}}{k_2} \quad [\text{Mpa}] \quad (4.1.2.4)$$

$\tau_s$	Smykové napětí	[MPa]
$\tau_{DS-Cu}$	Dovolené smykové napětí mědi	[MPa]
$\alpha$	Úhel smykové plochy drážky zátky	[°]
$Rp0,2_{Cu}$	Mez kluzu mědi	[MPa] [ 6 ]
$k_2$	Bezpečnost proti smyku	[-]

$$\tau_s = \frac{F}{2 \cdot \left( b \cdot \frac{h}{\cos \alpha} \right)} \leq \tau_{Ds-Cu} = \tau_s = \frac{600}{2 \cdot \left( 1,5 \cdot \frac{10}{\cos 11^\circ 18'} \right)} \leq \tau_{Ds-Cu}$$

$$\tau_s = 19,61 \text{ MPa} \leq 23,33 \text{ MPa} \Rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Volím bezpečnost proti smyku  $k_2 = 3$

$$\tau_{Ds-Cu} = \frac{Rp0,2_{Cu}}{k_2} = \frac{70}{3} = 23,33 \text{ Mpa}$$

## 4.2 Výběr výpočtových metod vhodných pro návrh tažného zařízení

### 4.2.1 Poloha a zdvih hydraulických nerezových trubek

Délka pohybového šroubu je  $l = 750 \text{ mm}$ , jeho průměr  $d = 6,35 \text{ mm}$  ( a nebo  $5 \text{ mm}$  ), přičemž musí být splněna podmínka kdy při max. zdvihu, musí zůstat v aktuátoru ještě  $21,9 \text{ mm}$  konce šroubu – viz. Příloha č.3 [ 4 ]. Této podmínce odpovídá mnou navržená délka nerezových hydraulických trubek s koleny. Při max. zdvihu zůstane ještě ve spodní hydraulické trubce, která je zafixována napevno a je tedy nepohyblivá,  $25 \text{ mm}$  trubky horní, tudíž nemůže dojít k úniku chladicí kapaliny. Při min. zdvihu ( tedy při spodní poloze šroubu ) se horní trubka do spodní v pořádku nasune, aniž by došlo k havárii ( nedojde k nárazu horní trubky do spodního přivařovacího kolena ). Viz. Příloha č.1.

## 5. Závěr

Navržené tažné, chladicí zařízení a zařízení přivádějící elektrický proud k zátce krystalizátoru umožní dokonalé a bezpečné natažení vytavovaného Ti – kontislitku za současného stavu chlazení a přivádění elektrického proudu k zátce krystalizátoru.

Mnou navržené tažné zařízení bude oproti stávajícím tažným zařízením mnohem menší z hlediska zastavěného prostoru, bude méně hlučné, nebudou na něj kladeny téměř žádné nároky na údržbu – čímž ušetříme provozní náklady, a přitom bude podávat stejný, výkon a ne-li lepší přesnost nastavení požadované polohy jako stávající tažná zařízení.

Navržené chladicí zařízení bude splňovat požadavek přivedení chladicí vody k zátce krystalizátoru za účelem uchlazení přetavovaného titanového kontislitku tak, aby nedošlo k natavení zátky popř. k jejímu spálení. Splnění požadavku na zabránění překročení teploty zátky nad 300 °C, dokazují i vytvořené grafické modely simulací rozložení teplotních polí jednotlivých zátek krystalizátorů, vytvořené v programu APEG.

Navržené zařízení přivádějící elektrický proud k zátce ( zdroj pro svařování pod tavidlem Forwel 1200 Golem ), splňuje požadavek funkce spočívávající ve schopnosti bezpečného vedení elektrického proudu k měděné trubce resp. zátce krystalizátoru a tedy společně s horními svařovacími kabely u hořáku, vytváří elektrický obvod pece.

## Seznam použité literatury

- [ 1 ] HUBKA, Vladimír.: Konstrukční nauka, Heurista, Zürich, 1995, 118 s.
- [ 2 ] VOMOČIL, Zdeněk – HAJKR, Zdeněk – JUREČKA, Pavel.: Cvičení pro sdílení tepla a proudění, I. Vydání, VŠB-TUO Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2000, 102 s.
- [ 3 ] Informace sdělené vedoucím bakalářské práce – NOGA, Zdeněk
- [ 4 ] Index – ServoDrive, Rotary Stepper motors ( rotační krokové motory ), [cit. 2008-10-13], Dostupné na World Wide Web:  
<http://www.servo-drive.com/>
- [ 5 ] Mechanické vlastnosti Ti, [ cit. 2009 - 03 – 07 ] , Dostupné na World Wide Web: [http://www.inkosas.cz/download/titan/titan\\_grade5.pdf](http://www.inkosas.cz/download/titan/titan_grade5.pdf)
- [ 6 ] Mechanické vlastnosti Cu, [ cit. 2009 – 03 – 08 ], Dostupné na World Wide Web: <http://www.esbrno.com/download/odlitky/slevarna.pdf>
- [ 7 ] ARMAT spol s.r.o. – nerezové trubky, profily, kolena, redukce, šroubení, příruby a další příslušenství hydraulických obvodů, [cit. 2008 – 12 – 05 ], Dostupné na World Wide Web: <http://www.armat.cz/hlavni-katalog.html>
- [ 8 ] Rena - cz, Šroubení a příslušenství pro hydraulické a pneumatické obvody, [cit. 2008-12-06], Dostupné na World Wide Web:  
<http://www.az-sroubeni.cz/detail/sroubeni-walterscheid/prevlecna-matice-1/>
- [ 9 ] Měděné tyče kruhové, [ cit. 2009 – 02 – 20 ], Dostupné na World Wide Web:  
[http://www.khc.cz/cesky/tabulky/cu\\_tyce\\_kruhove.php](http://www.khc.cz/cesky/tabulky/cu_tyce_kruhove.php)
- [ 10 ] Formica s.r.o. – svářečské a plazmové zařízení, [ cit. 2009 – 03 – 02 ], Dostupné na World Wide webs: <http://www.formicaweld.cz/produkty/products.html>
- [ 11 ] Hennlich – Rychlospojky Walter, [cit. 2009 – 02 – 05 ], Dostupné na World Wide Web: <http://www.hennlich.cz/index.php?obrazek=7882>
- [ 12 ] Podklady dodané vedoucím bakalářské práce – 3D model tažné sekce v programu Inventor
- [ 13 ] Hodnoty součinitelů místních ztrát - zdroje tepla a základní tvarovky potrubí, [ cit. 2009-03-02 ]. Dostupné na World Wide Web:  
<http://vetrani.tzb-info.cz/t.py?t=16&i=21&h=38&obor=7>

## **-Použitý SW**

[ 14 ] Zoner photo studio 9

[ 15 ] Autocad 2000

[ 16 ] Sada Microsoft Office 2003

[ 17 ] Program MKP na simulaci teplotních polí – APEG

## Seznam příloh

Příloha č. 1 – Schémata polohy a zdvihu hydraulických nerezových trubek

Příloha č. 2 – Grafy místních ztrátových součinitelů

č. 2.1 – Součinitel místní ztráty pro ohyb kruhového průřezu

č. 2.2 – Součinitel místní ztráty - Vtok s náhlým zúžením průřezu

č. 2.3 – Součinitel místní ztráty – Vtok s náhlým rozšířením průřezu

č. 2.4 – Součinitel místní ztráty – Koleno ostré

č. 2.5 - Součinitel místní ztráty – Vtok do trubky s ostrou hranou

Příloha č. 3 – Hybridní krokový aktuátor NEMÁ 17

Příloha č. 4 - Graf rozdílů celkových tlakových ztrát při zvýšení rychlosti chladicí vody

## Výkresy

Výkres sestavení – Tažná sekce SB3KSV02–S01

Výkres sestavení – Horní chladicí část SB3KSV02-S02

Výkres výrobní – Rozváděcí kostka SB3KSV02-D01



